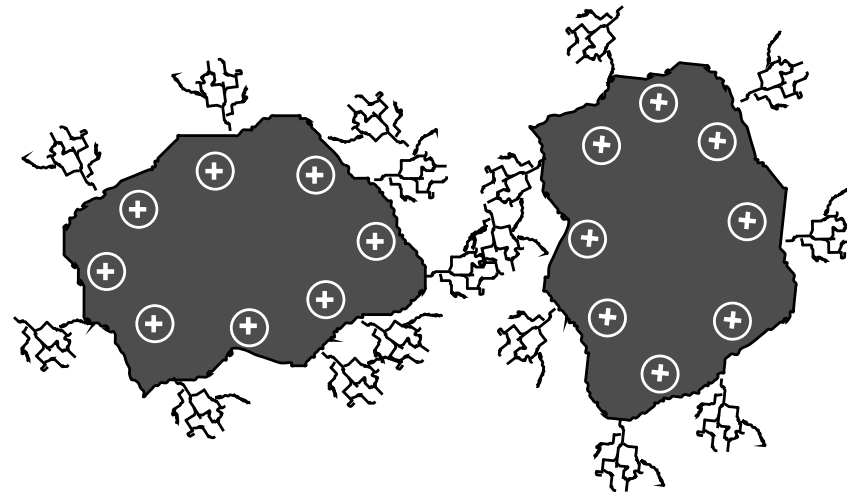


Adjuvants et nouveaux bétons



Sommaire

- 1. Généralités**
- 2. Les entraîneurs d'air**
- 3. Les accélérateurs**
- 4. Les retardateurs**
- 5. Les plastifiants / super plastifiants et BAP**
- 6. Les agents viscosants et les réducteurs de retrait**
- 7. BHR / BFUP**
- 8. L'essentiel**

1. Généralités

Adjuvants:

- Liquides ou poudre
- Ajoutés au mélange pendant le malaxage
- Dans une proportion de 5% maximum de la masse du liant (en général le ciment)
- Par leur action physique et/ou chimique, ils modifient les propriétés du béton frais et/ou du béton durci.



1. Généralités

But des adjuvants :

- Améliorer les performances (résistances mécaniques et durabilité)
- Compensation des déficiences (par exemple fissuration de retrait)

Remarque : L'utilisation d'adjuvants augmente le coût du béton

2. Les entraîneurs d'air

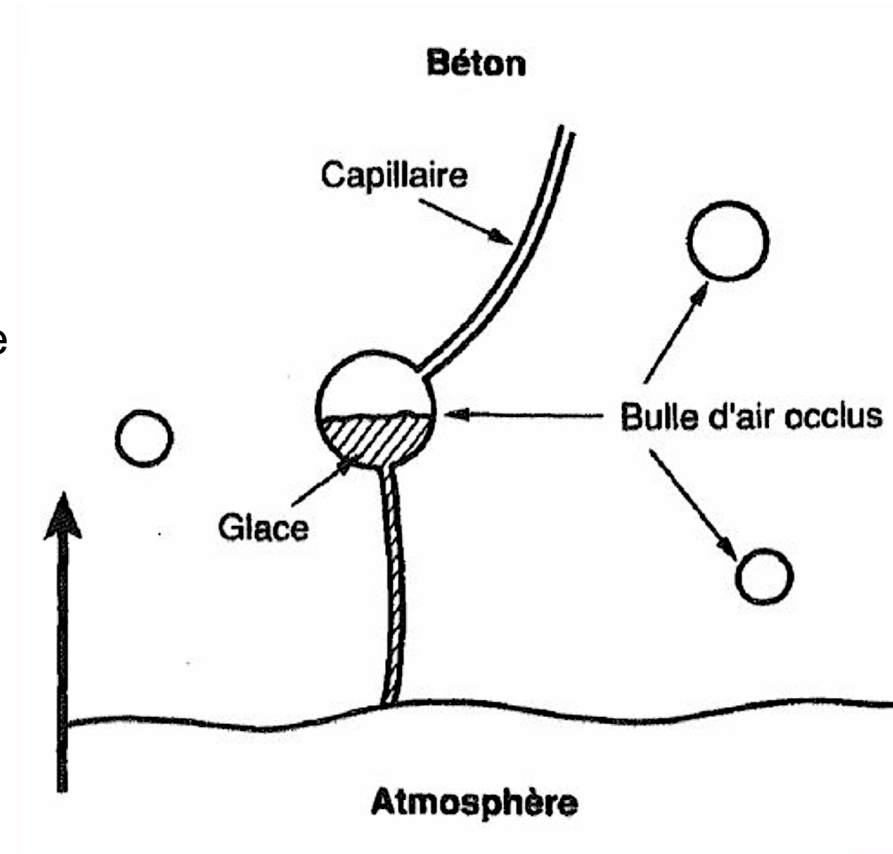
Problématique :

Résistance au gel

Solution :

Ajout d'entraîneur d'air :

- Créer le volume nécessaire à l'expansion de la glace sans endommager la microstructure du béton



2. Les entraîneurs d'air

Composition :

- Composés **tensio-actif** comme des sels de sodium ou des acides gras organiques, principalement anioniques

Mécanisme des tensioactifs :

- Polymères à **longues chaînes** avec un groupe polaire à une extrémité
- Les molécules se concentrent à **l'interface air-liquide**

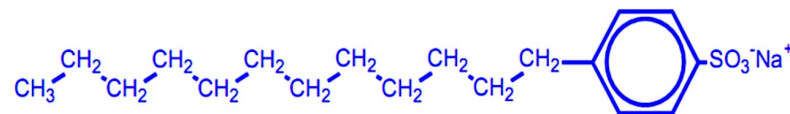
Chaîne hydrophobe
(insoluble dans l'eau)

Tête hydrophile
(soluble dans l'eau)



Anionique – **COO⁻**
– **SO₄²⁻**
– **SO₃⁻**

Ex: Dodecylbenzenesulfonate de Na (DDBS)

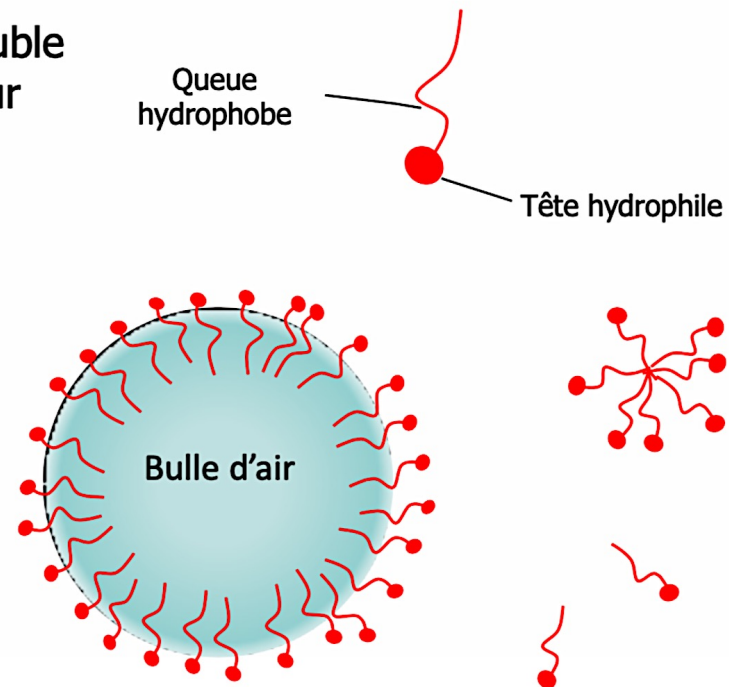


2. Les entraîneurs d'air

Mécanisme des tensioactifs :

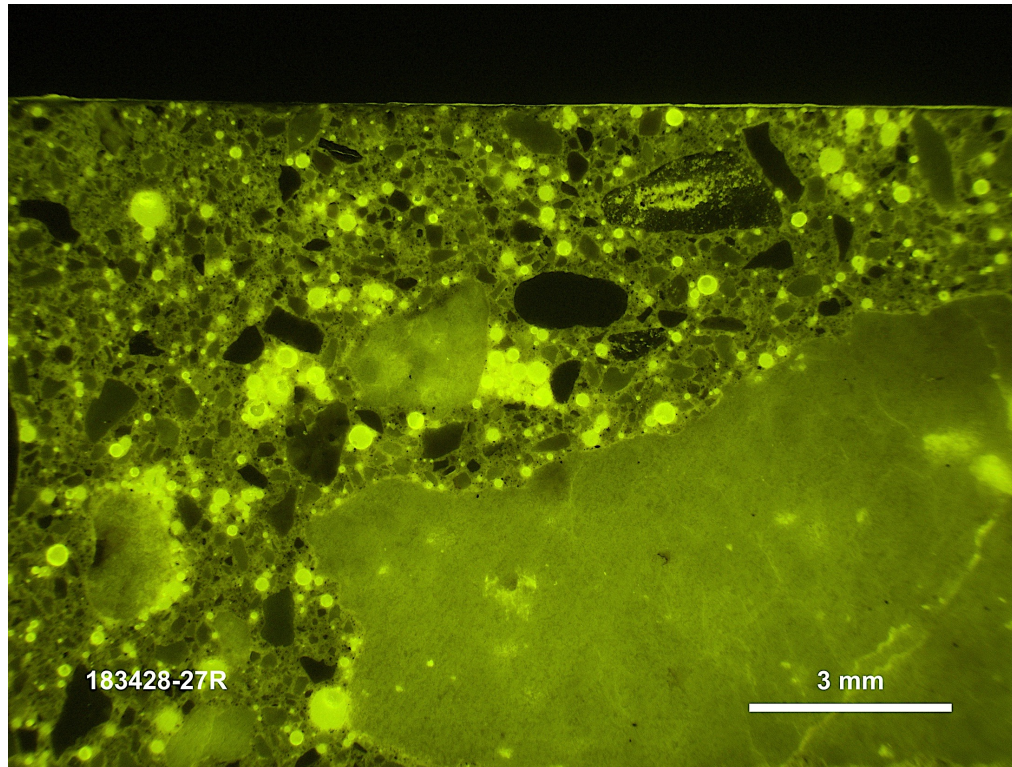
- Les groupes **polaires** s'alignent côté **liquide**
- Les groupes **non-polaires** s'alignent côté **air**

Formation d'un film insoluble
(et hydrophobique) autour
des vides d'air



2. Les entraîneurs d'air

Béton avec entraîneur d'air (pores de diamètres 10 à 500 microns) :



- L'ajout d'entraîneur d'air améliore également l'ouvrabilité du béton frais
- Pour ne pas engendrer une perte trop importante de résistance à la compression, le volume total de pores ne doit pas dépasser env. 4%_{vol.}

3. Les accélérateurs

Problématique :

Besoin d'accélérer le processus d'hydratation pour avoir une prise plus rapide et une résistance au jeune âge améliorée

Nécessité de :

- Avancer les opérations de finition
- Réduire le temps de cure
- Augmenter la vitesse de durcissement pour le décoffrage et la mise en service
- Réduire le risque de gel du béton à l'état frais en hiver

Solutions :

- Augmenter la cinétique d'hydratation
- Ajout d'un accélérateur

3. Les accélérateurs

Les principales classes d'accélérateurs :

A. Effet instantané (accélérateur de prise)

Application : Shotcrete (béton projeté)

Composition : les sels d'aluminium (alumino-sulfates)

B. Effet dans les premières heures (accélérateur de durcissement)

Application : la préfabrication

Composition : Les chlorures de calcium / sodium, les solutions de CSH ...

→ **Attention à la corrosion des armatures!**

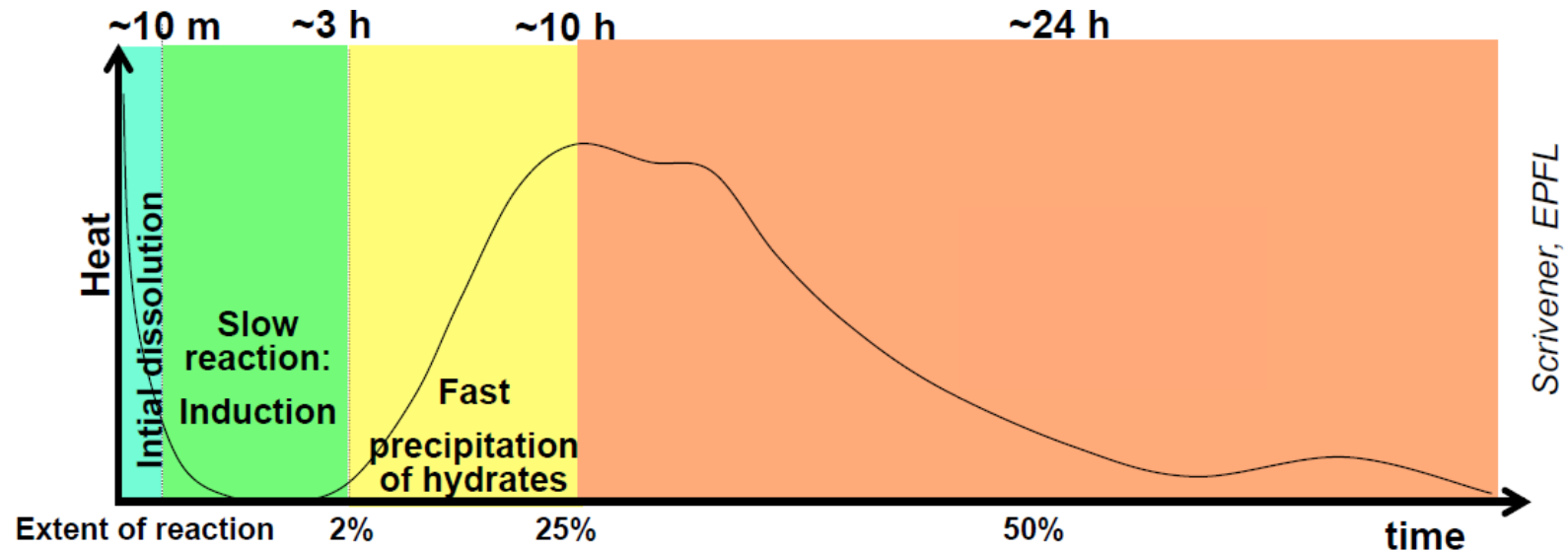
C. Effet dans les premiers jours (accélérateur de durcissement)

Application : Mélanges prêt à l'emploi (démoulage rapide)

Composition : Tri-isopropanol amine TIPA

3. Les accélérateurs

Processus d'hydratation, rappel

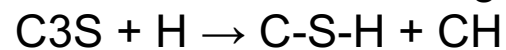


Phases anhydres :

Silicates: Alite (C3S), Belite (C2S)

Aluminates: C3A, C4AF

Hydratation :



3. Les accélérateurs

CaCl₂, très efficace, mais attn corrosion des armatures

Mécanisme :

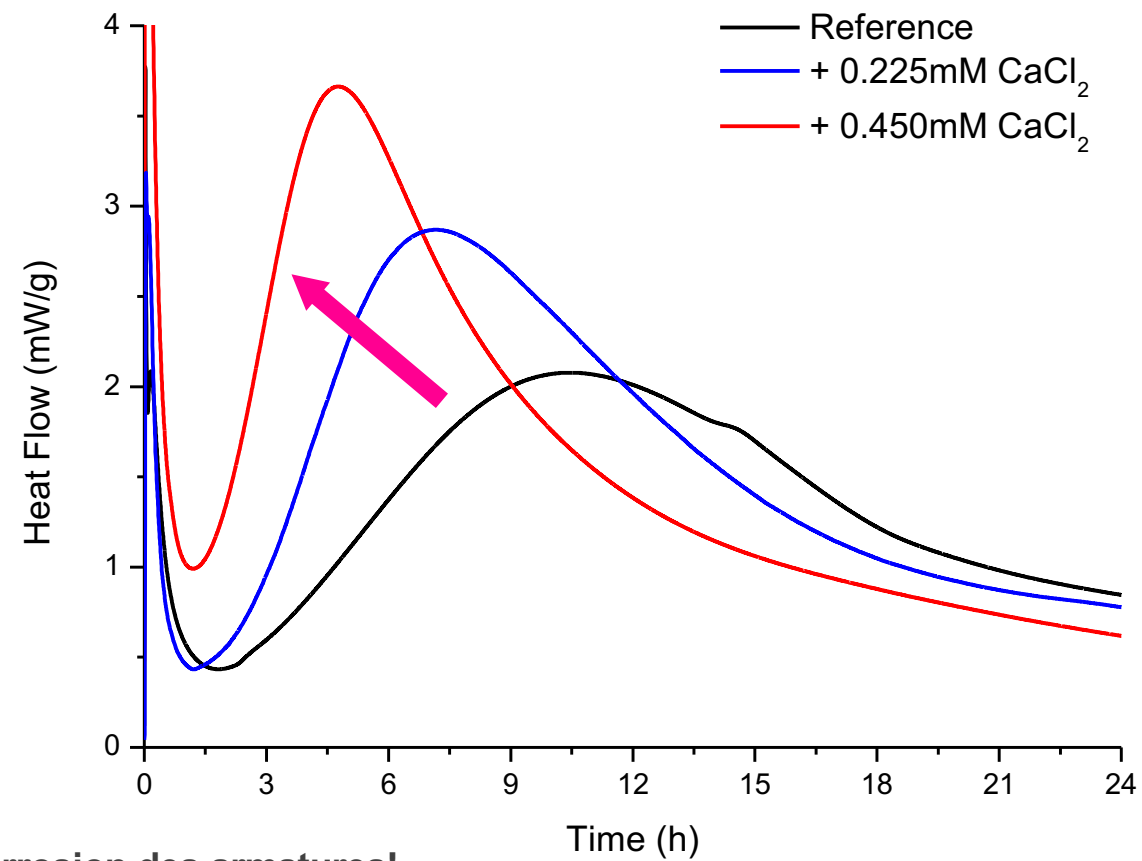
Pas encore clair pour le moment

Hypothèses :

- Augmentation de la solubilité des ions calcium en solution
- Effet des chlorures sur la cinétique de dissolution
- Effet des chlorures sur la croissance des hydrates

3. Les accélérateurs

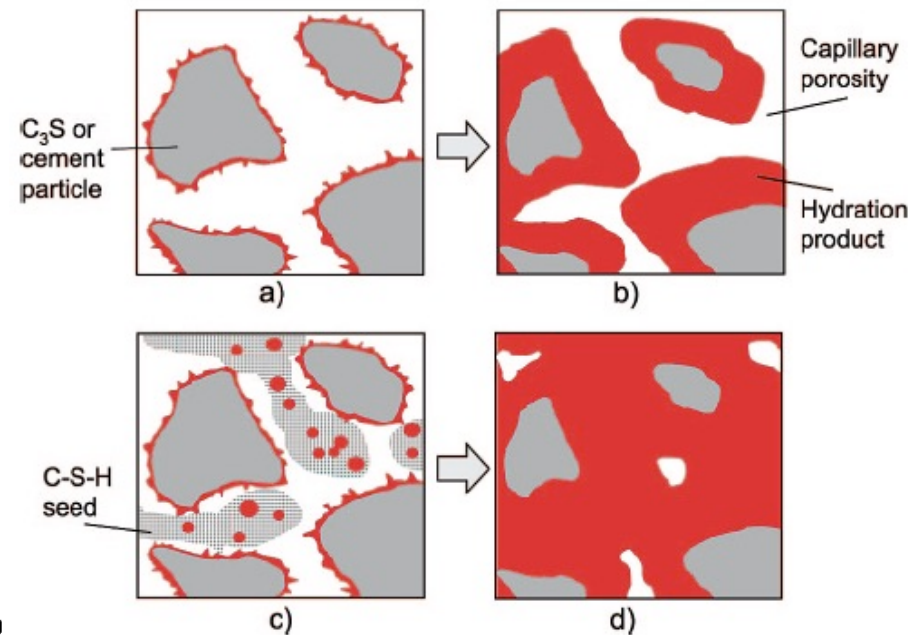
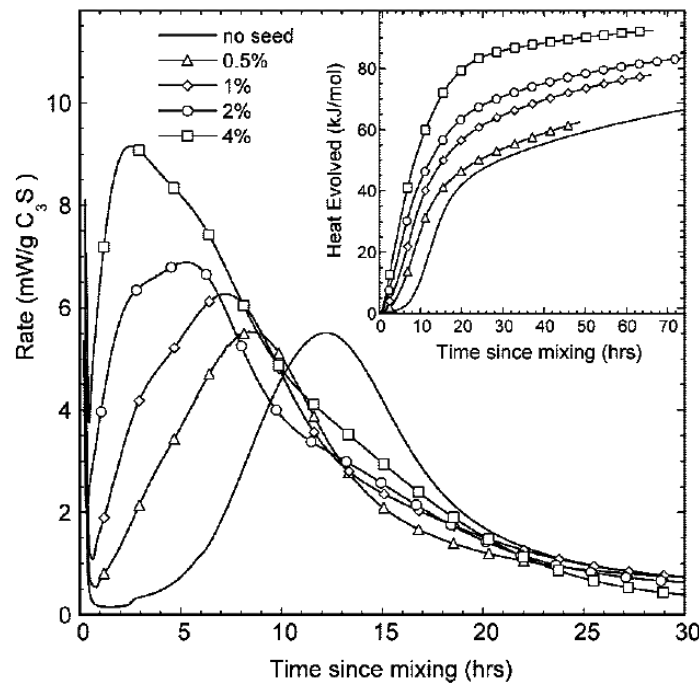
Exemple : Effet du CaCl_2



→ Attention à la corrosion des armatures!

3. Les accélérateurs

Exemple : **Addition de nuclei de C-S-H**



- Réduction de l'énergie de nucléation
- La croissance des hydrates peut commencer presque instantanément

3. Les accélérateurs

Exemple de mauvaise utilisation d'un accélérateur :

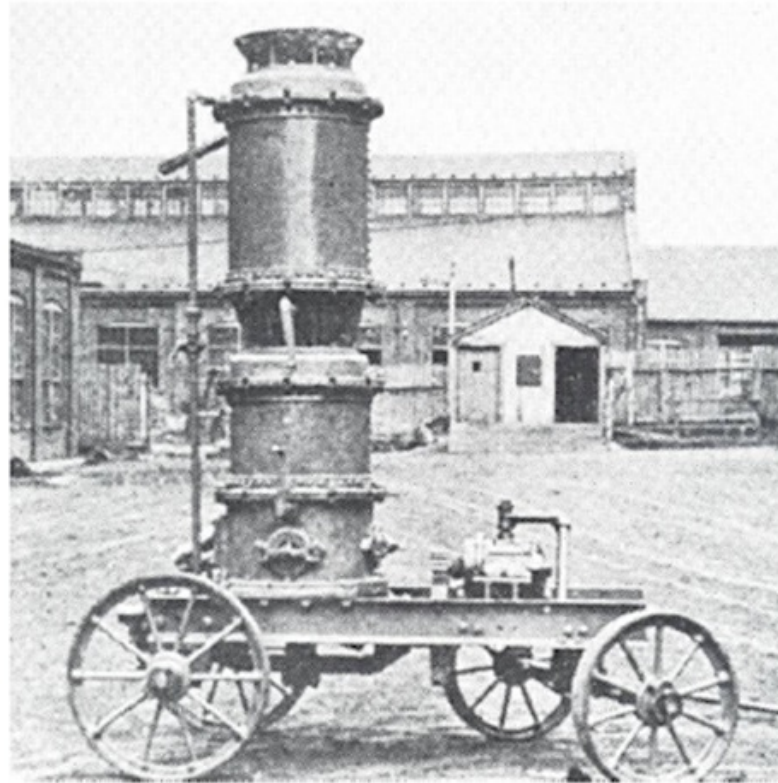


3. Les accélérateurs

Invention du béton projeté (shotcrete) : 1907



Carl E. Akeley (1864-1926)



'cement-gun' 1910

3. Les accélérateurs

Béton projeté - exemple d'application

Retenue d'eau des Marécottes (1926)

Alexandre Sarrasin (1895-1976)

voûte en béton projeté



3. Les accélérateurs

Béton projeté - exemple d'application

Stabilisation de falaises



3. Les accélérateurs

Béton projeté - exemple d'application

Construction du M2, Lausanne : tunnel St-Laurent



3. Les accélérateurs

Béton projeté - exemple d'application

Tunnels



3. Les accélérateurs

Béton projeté - exemple d'application

Tunnels



3. Les accélérateurs

Application :



Shotcrete

SIKA TUNNELING AND MINING

© Copyright Sika Services AG 2014 - All rights reserved



4. Les retardateurs

Problématique :

besoin d'empêcher la prise

Nécessité de :

- Prolonger la période avant la prise
- Compenser l'accélération de la prise sous les effets de la chaleur



Solution :

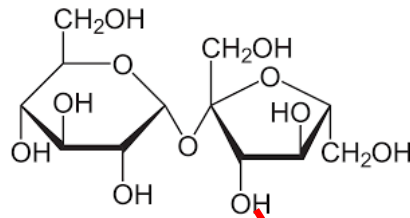
retarder la cinétique d'hydratation

→ ajout d'un retardateur

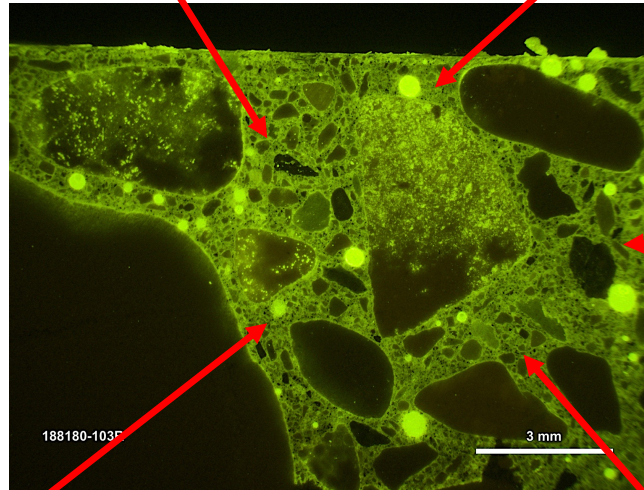
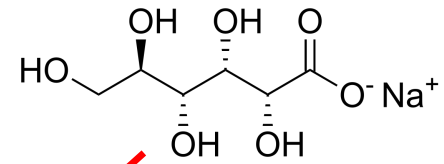
4. Les retardateurs

Composition :

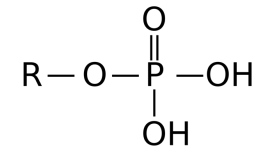
sucrose



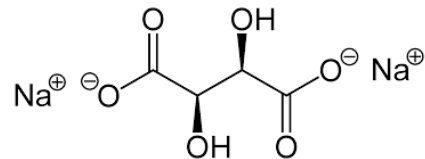
gluconate de sodium



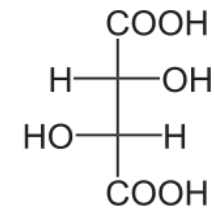
phosphate



tartrate de sodium



acide tartrique



4. Les retardateurs

Mécanisme :

Pas encore clair pour le moment

Hypothèses :

- **Adsorption** de l'adjuvant sur les phases en dissolution ou précipitées → réduit la cinétique d'hydratation
- L'adjuvant réagit avec des composants du mélange et se **précipitent** sur les anhydres → formation d'une couche protectrice
- **Complexation** de l'adjuvant avec les ions Ca^{2+} → réduction des ions Ca^{2+} disponibles
- L'adjuvant bloque les sites de nucléation des hydrates par **nucléation** → inhibe la formation de nouveaux hydrates

5. Les plastifiants / super plastifiants

Problématique :

Besoin d'ouvrabilité pour la mise en place sans perdre de propriétés mécaniques et/ou de durabilité

Respecter les exigences normatives
SN EN 206

→ Rappel : l'ajout d'eau augmente la porosité capillaire!

Solution :

Addition d'un plastifiant ou superplastifiant (dosage 0.1-1%)



5. Les plastifiants / super plastifiants

Fluidification

OU

Réduction du rapport
e/c
(durabilité -
résistance)

OU

Réduction de la teneur
en ciment



5. Les plastifiants / super plastifiants

Développements récents de la technologie des bétons:

→ **adjuvants organiques** et **additions minérales**



HPC
High Performance
Concretes

BFUP
Béton fibré à ultra
haute performance



Béton projeté

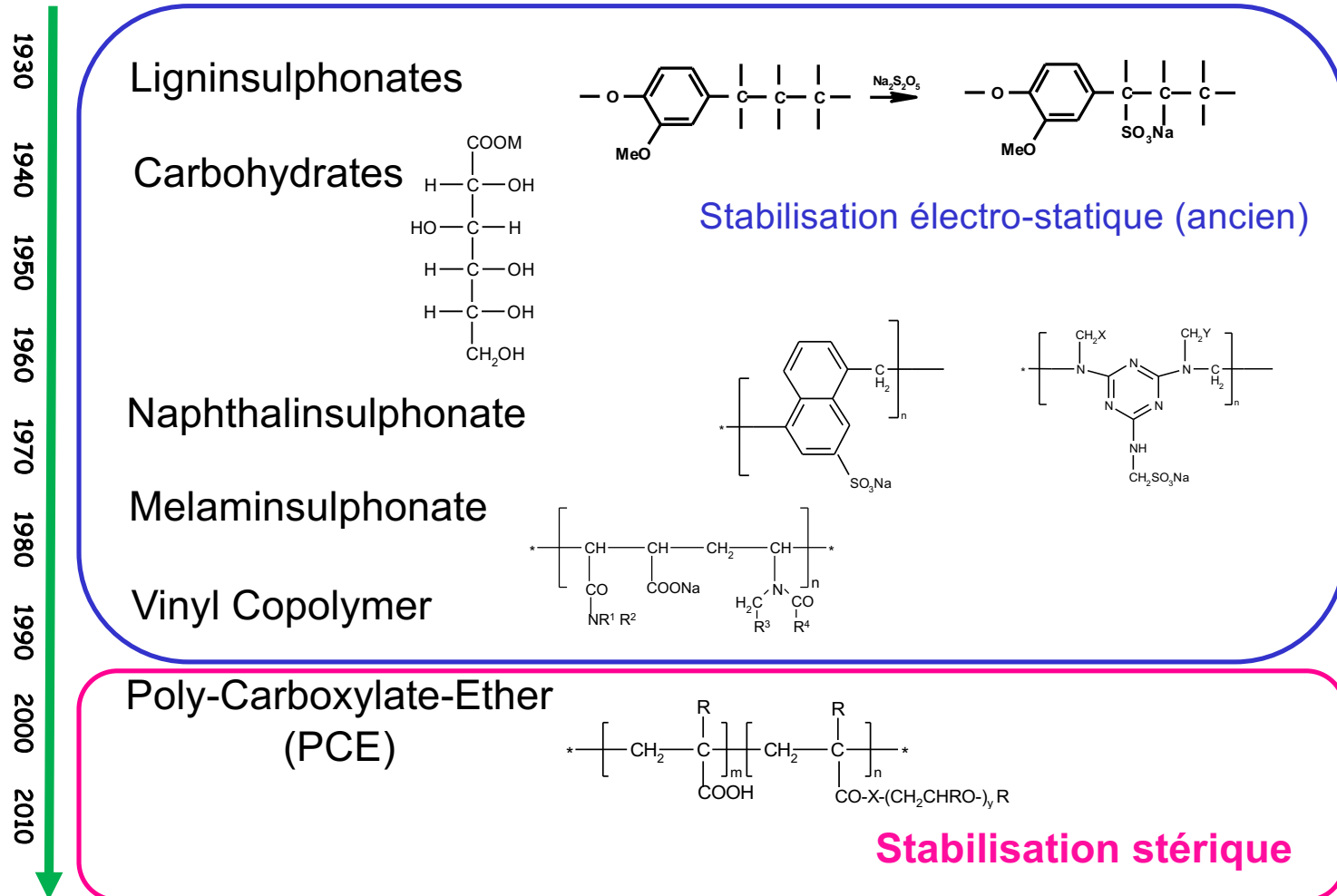


SCC / BAP
Béton auto plaçant



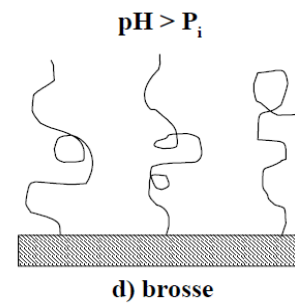
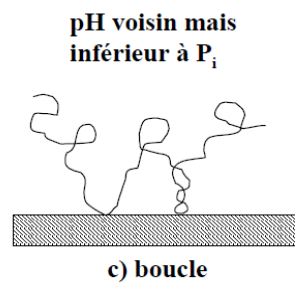
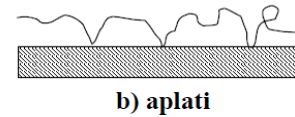
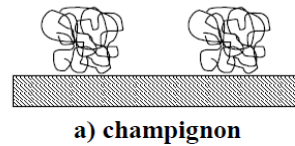
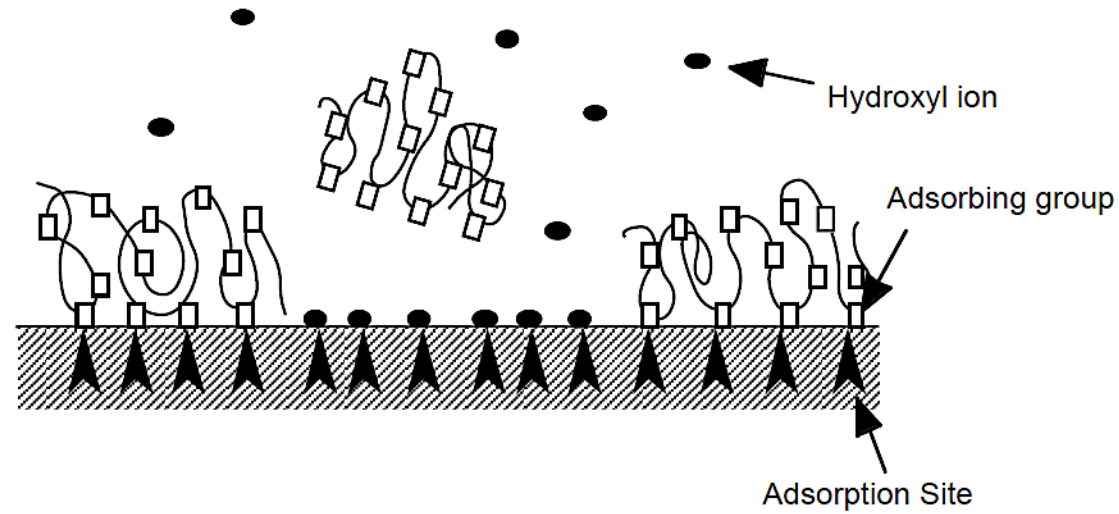
5. Les plastifiants / super plastifiants

Historique des plastifiants / super plastifiants et composition



5. Les plastifiants / super plastifiants

Mécanisme :

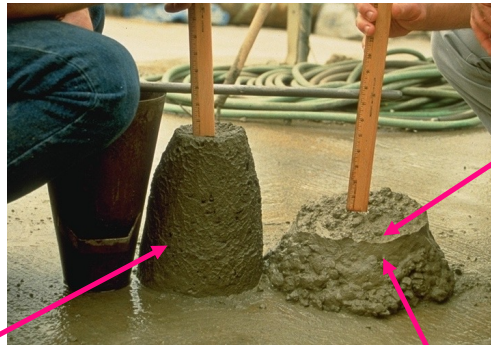
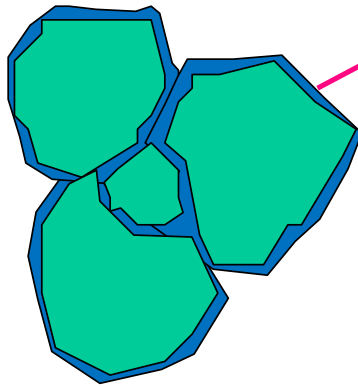


[Flatt, 1999]
[Perche, 2004]

5. Les plastifiants / super plastifiants

Mécanisme :

Forces de Van der Waals
(attractive)

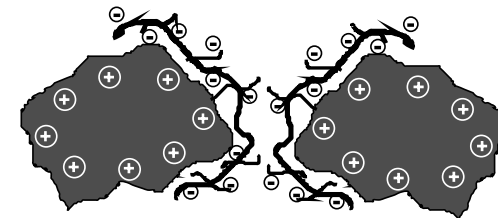


Répulsion stérique



Ou:

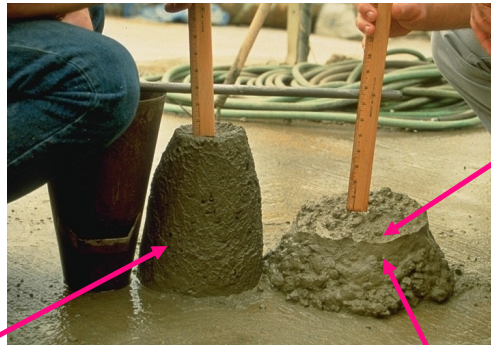
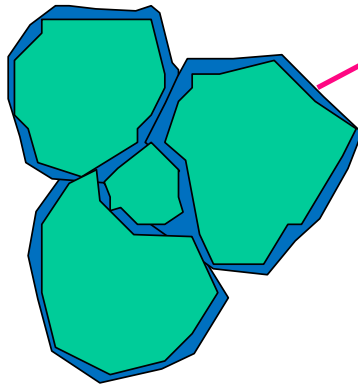
(Répulsion électrostatique)



5. Les plastifiants / super plastifiants

Mécanisme :

Forces de Van der Waals
(attractive)



Répulsion stérique



(Répulsion électrostatique)



La surface spécifique du mélange influence l'effet de l'adjuvant!

→ Importance des « fines » dans le sable du mélange

5. Les plastifiants / super plastifiants

Mécanisme :



5. Les plastifiants / super plastifiants

Mécanisme :

Deux bétons à ouvrabilité identique:

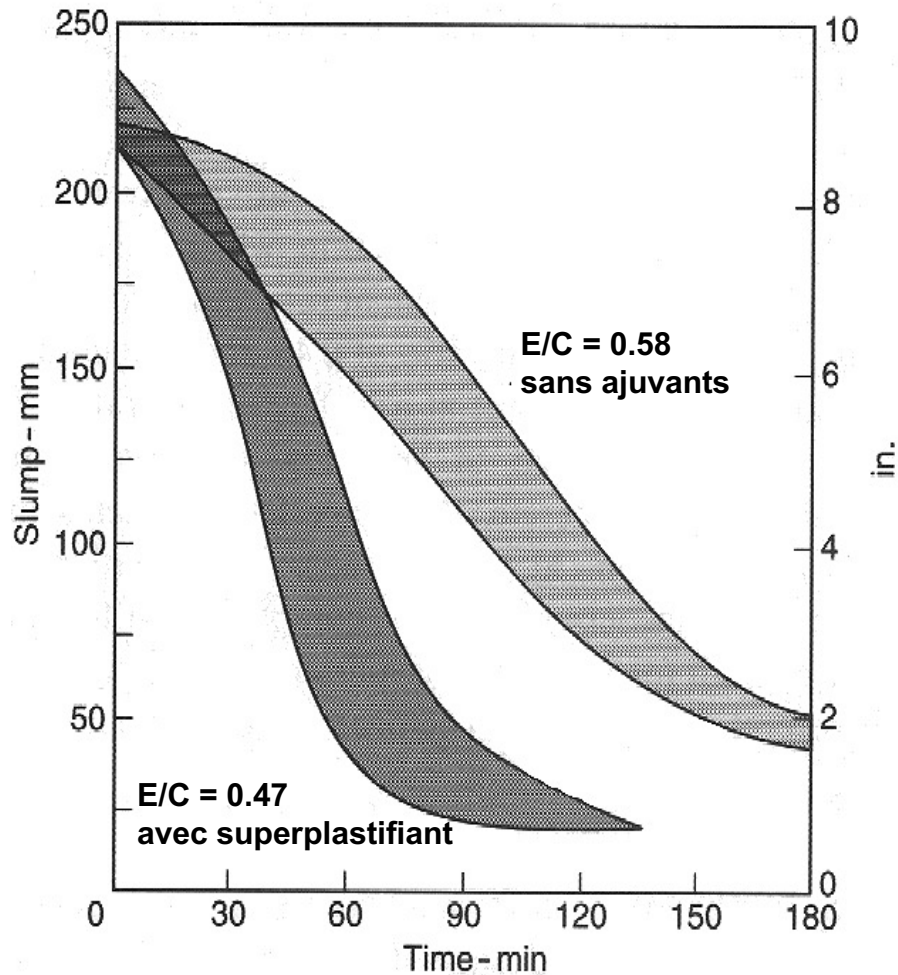


[Maeder et al., 1999]

5. Les plastifiants / super plastifiants

Mécanisme :

Perte de slump :



L'effet des SPs est limité dans le temps : Ils sont absorbés dans les produits d'hydratation des aluminates.

La vitesse de perte d'efficacité dépend de:

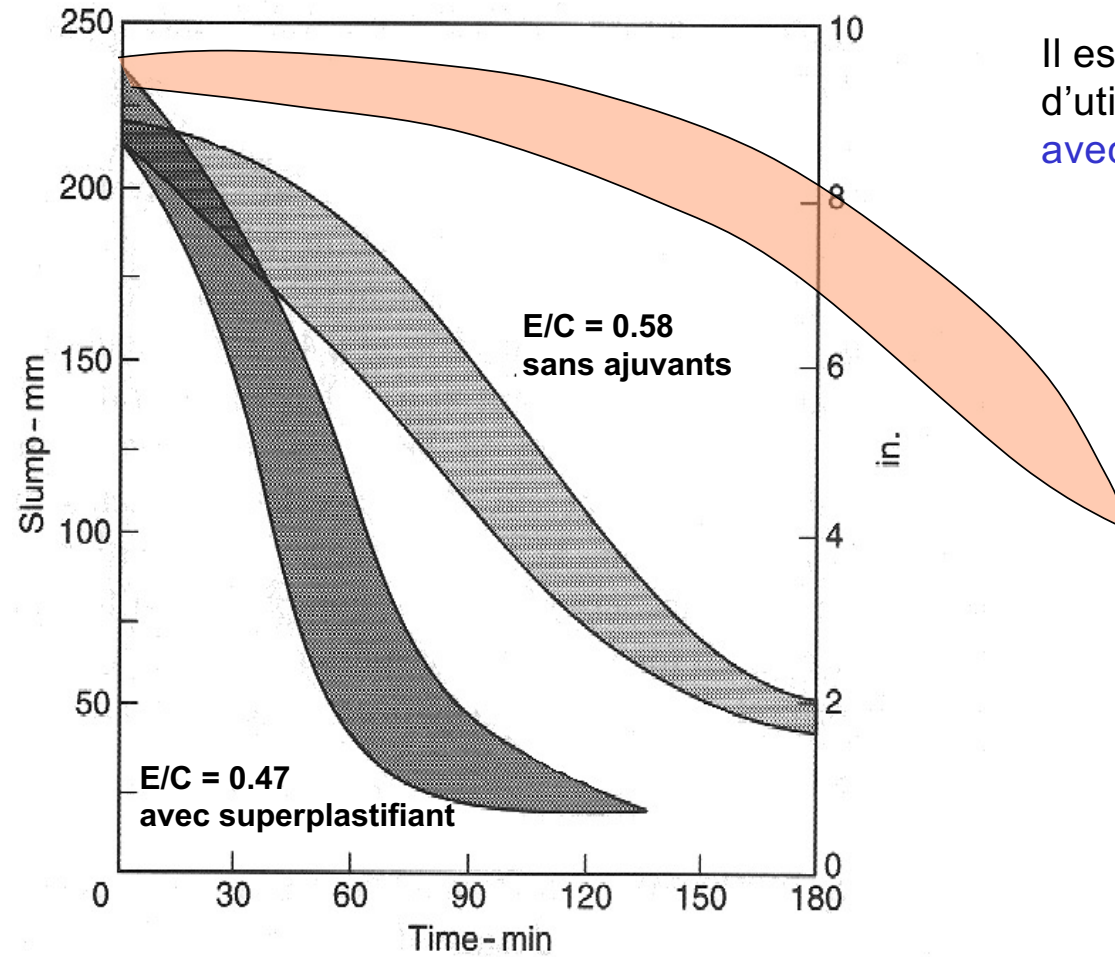
- C_3A , SO_3 , alcalins
- température
- finesse

La perte de l'effet peut être minimisée en retardant l'addition d'adjuvant (sur chantier)

5. Les plastifiants / super plastifiants

Mécanisme :

Perte de slump :

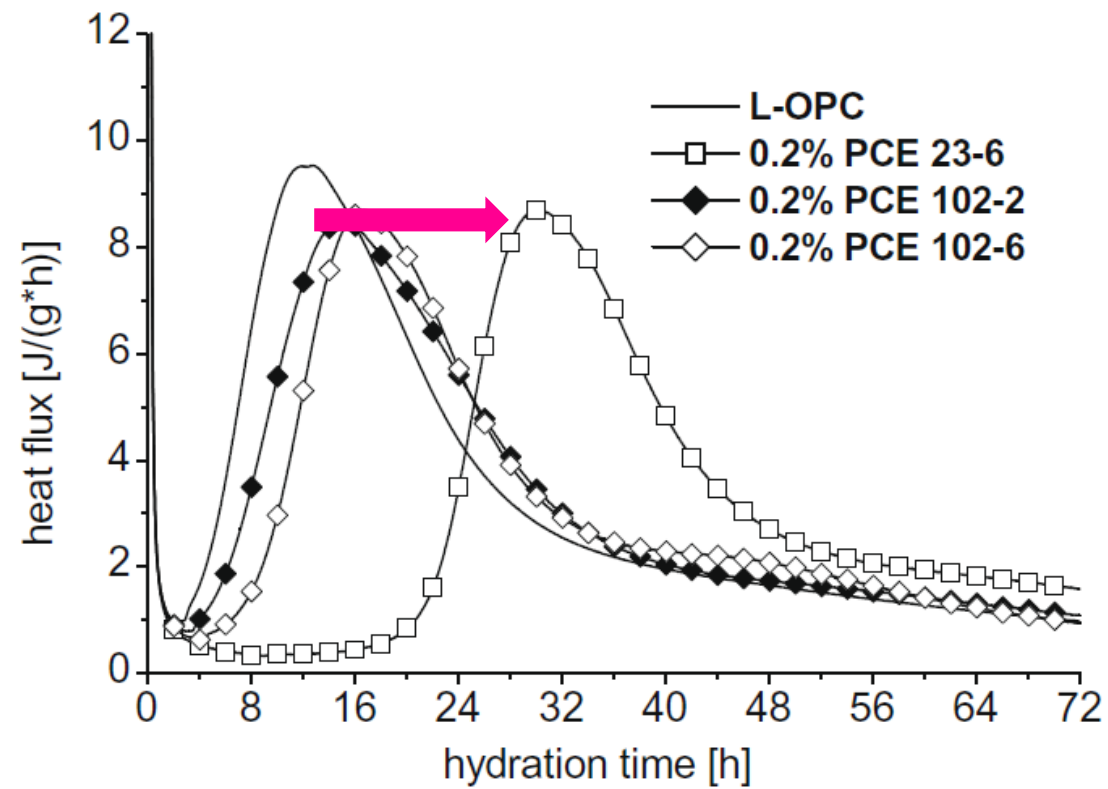


Il est également possible
d'utiliser le superplastifiant
avec un retardateur

5. Les plastifiants / super plastifiants

Attention cependant à l'effet des PCE:

Certains ont un effet retardateur



6. Les réducteurs de retrait

Les différents types de retrait :

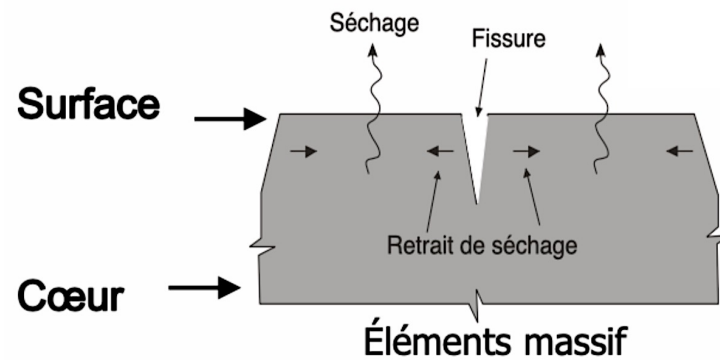
- **retrait plastique**
 - évaporation de l'eau de gâchage pendant la prise
- **retrait endogène**
 - changement de volume du mélange sous l'effet de l'hydratation
- **retrait de séchage**
 - évaporation de l'eau de la porosité capillaire (après la prise)
- **retrait thermique**
 - variation de température due à l'hydratation

6. Les réducteurs de retrait

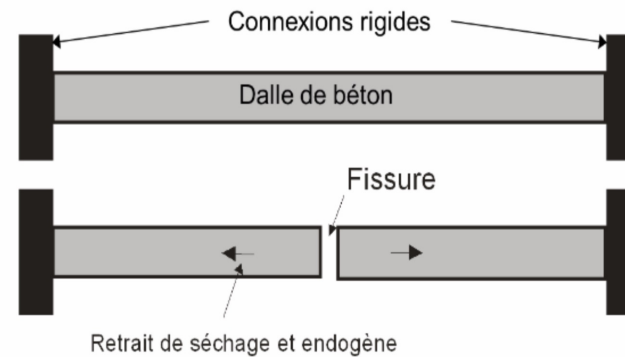
Problématique :

risques de l'apparition de fissures lors du retrait

fissuration de retrait :



fissuration de retrait entravé :



Solutions :

Ajout d'agents anti-retrait de type surfactant

6. Les réducteurs de retrait



Photo 3 – Contrecoeur de fenêtre fissuré (sud)



Photo 4 – Fissure pénétrant profondément dans le béton (mur nord)

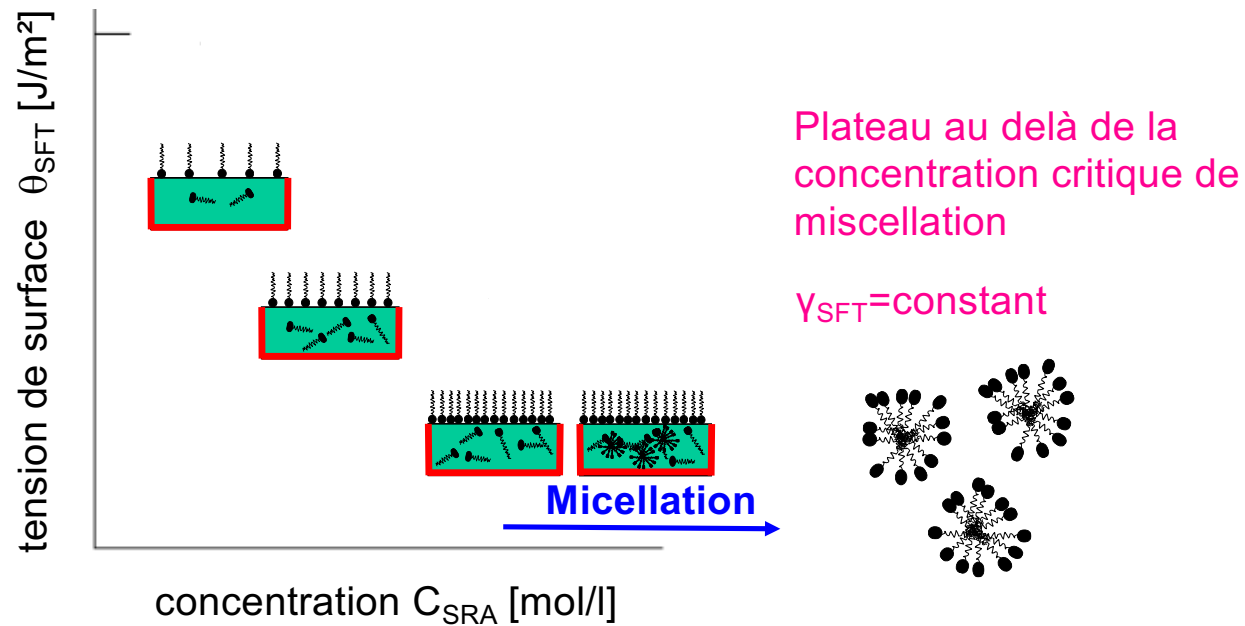
6. Les réducteurs de retrait

Mécanisme :

Activité de surface des surfactants non-ioniques

Composition : p. ex. éthers de glycoles

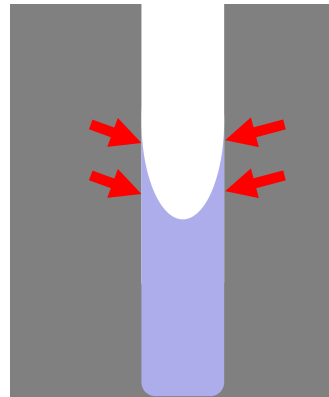
⇒ Un excès de surfactants en surfaces [mol/m^2] réduit la tension de surface du béton



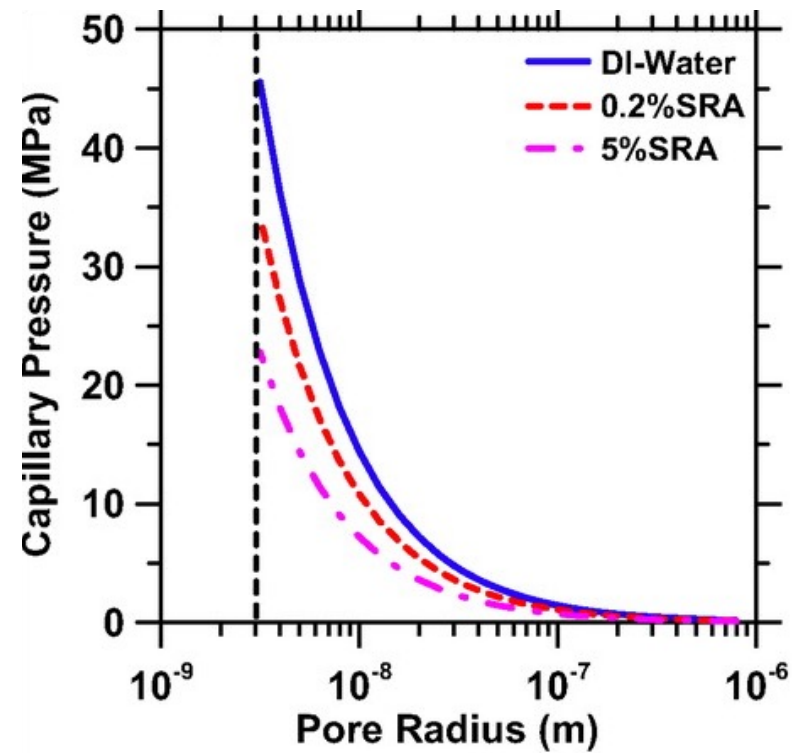
6. Les réducteurs de retrait

Mécanisme :

surface de béton sans SRA:



surface de béton avec SRA:



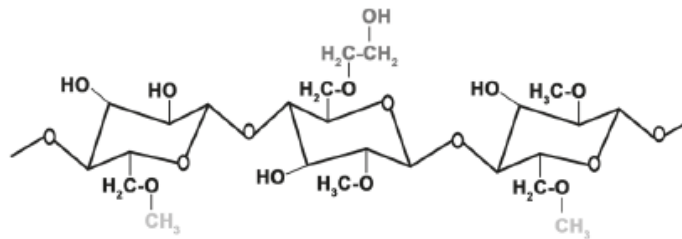
6. Les agents viscosants

Problématique :

- Ségrégation du béton

Solutions :

- Ajout d'agents de viscosité comme les éthers de cellulose, glucose, ou les gommes naturelles

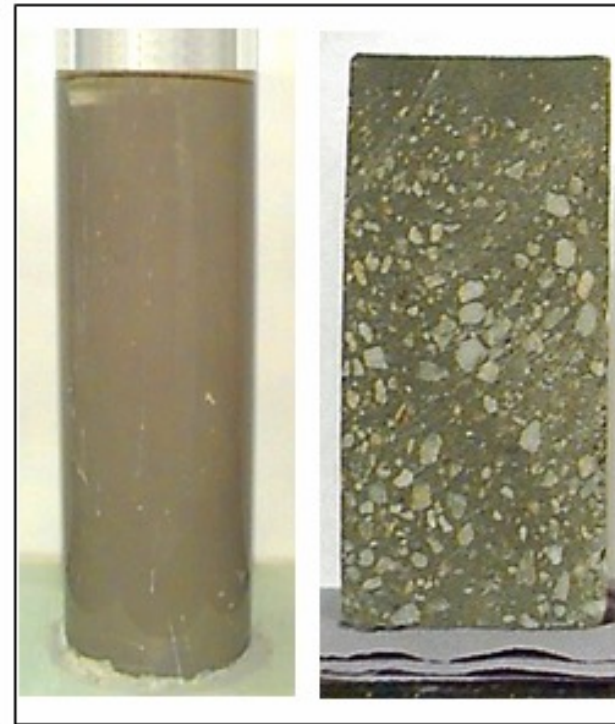


6. Les agents viscosants

béton homogène :

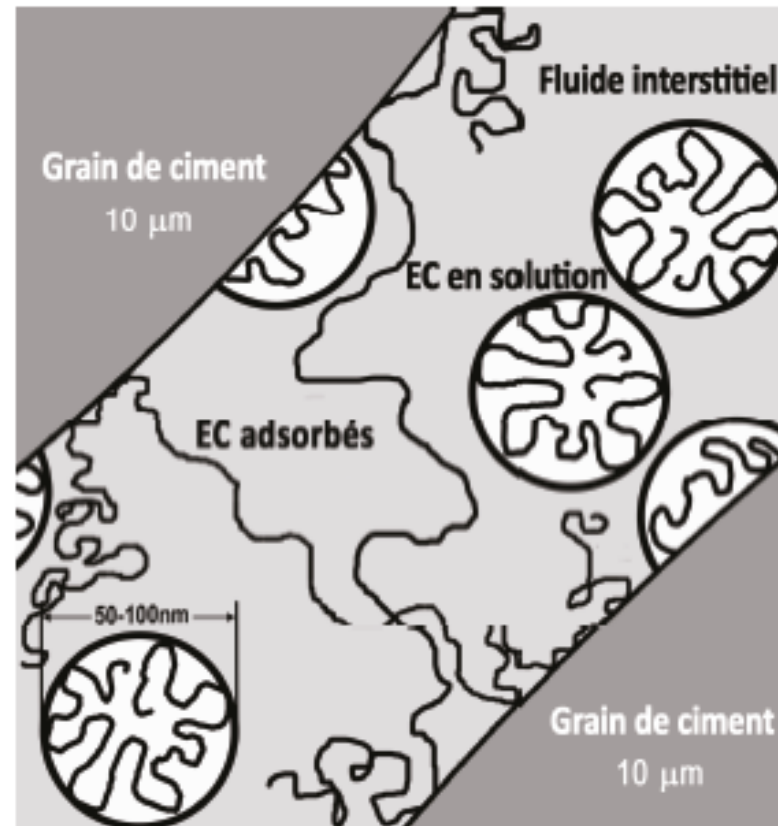


béton ségrégué :



6. Les agents viscosants

Mécanisme :



7. BHP/BFUP et BAP

BAP



7. BHP/BFUP et BAP

Les développements récents dans la technologie des bétons dépendent de l'utilisation des adjuvants et des additions minérales

Bétons autoplacants /
autocompactants
BAP

Bétons à haute
résistance
BHR et béton fibrés à ultra
haute performance **BFUP**

7. BHP/BFUP et BAP

BAP

- Auto-nivelant
- Pas de ressuage
- Facile à mettre en place (enrobage des armatures)
- Pas de mise en place par vibration (gain de temps et de main d'oeuvre)



7. BHP/BFUP et BAP

BAP

→ Cadence de construction augmentée

250 m high building Roppongi Hills, Tokyo

April



June



August



October



December



7. BHP/BFUP et BAP

BAP

Technologie des matériaux :

- Augmentation du contenu en ciment et en additions minérales (p. ex. fillers calcaires, cendres volantes)
- Espacement des granulats
- Utilisation de super plastifiants
- Utilisation d'épaississants pour éviter la ségrégation du mélange

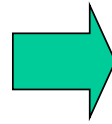
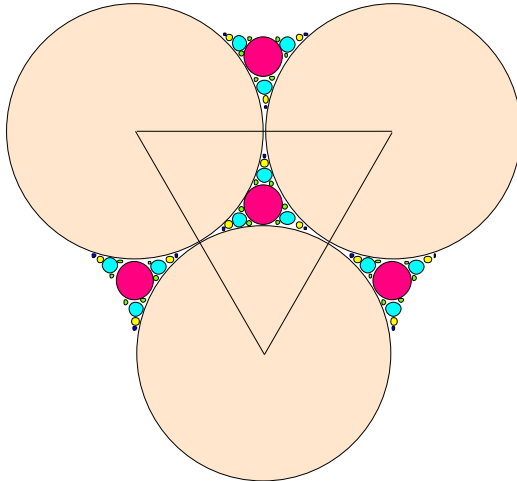
7. BHP/BFUP et BAP

BAP

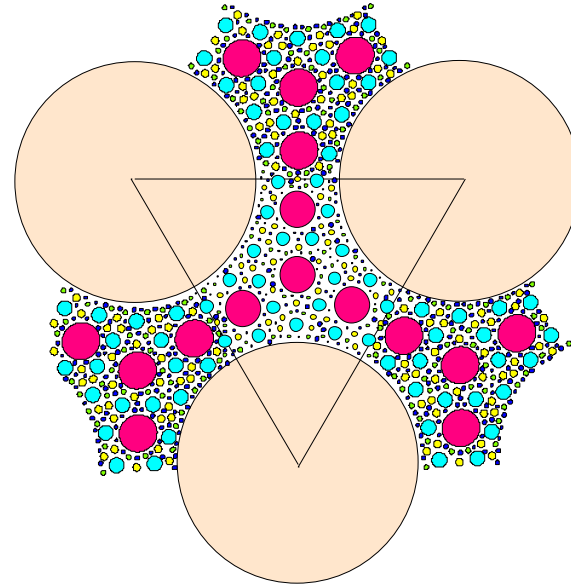
Augmenter la quantité de pâte avec **Utilisation de fillers calcaire, cendres volantes, ...**

→ augmentation du film lubrifiant (réduction des frottements entre les granulats)

béton classique :



béton autoplaçant :

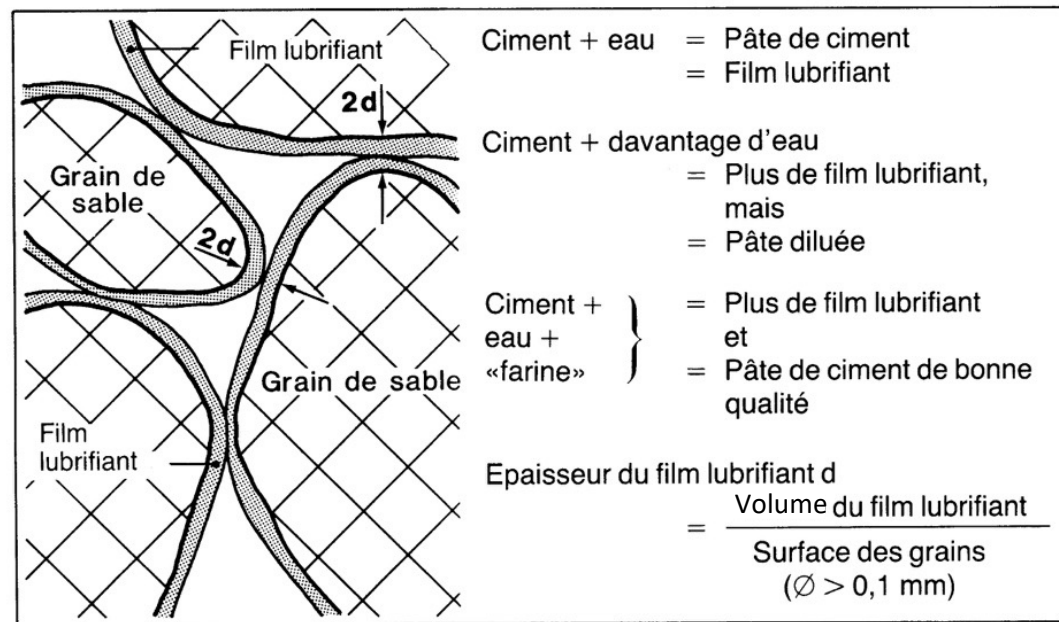


7. BHP/BFUP et BAP

BAP

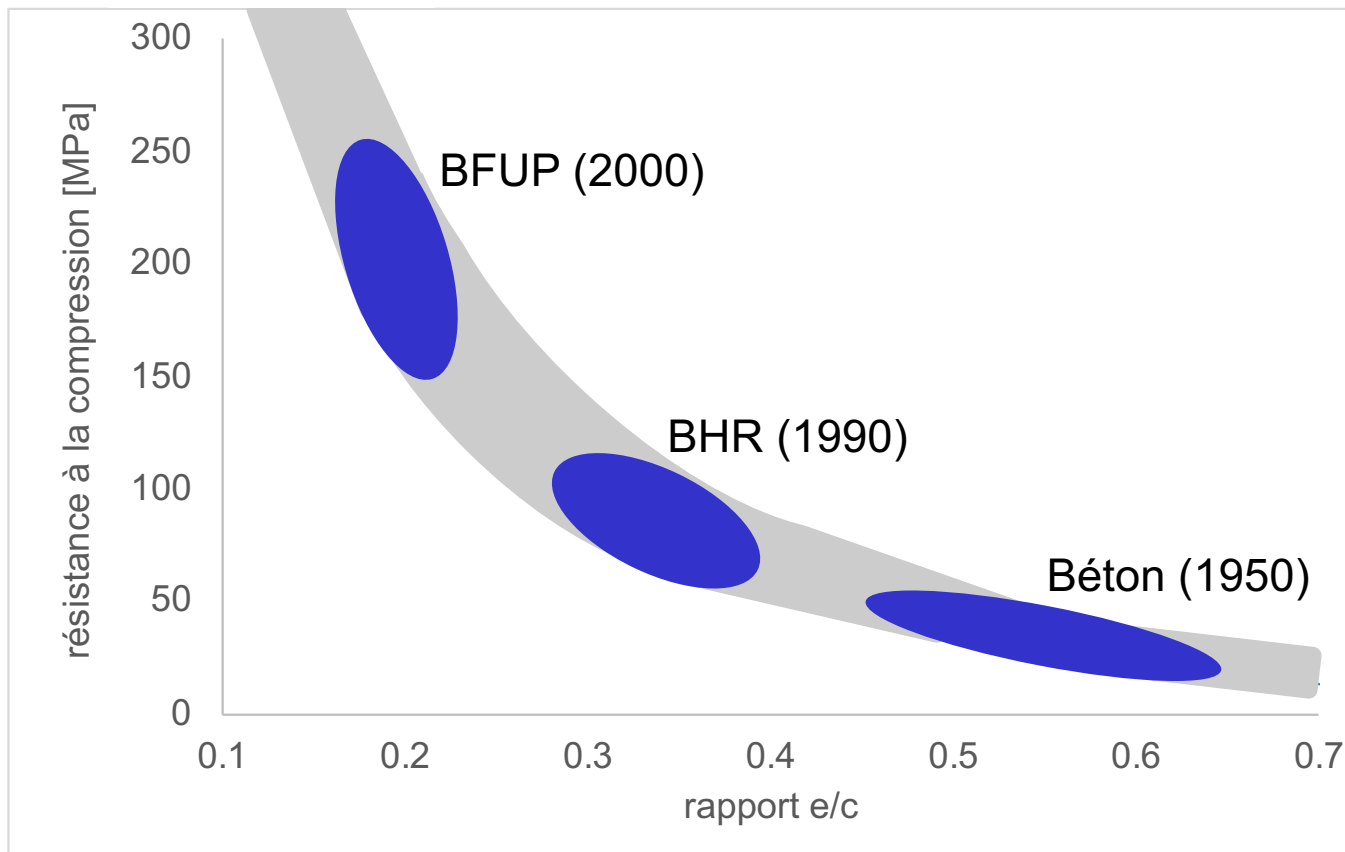
Augmenter la quantité de pâte avec **Utilisation de fillers calcaire, cendres volantes, ...**

→ augmentation du film lubrifiant (réduction des frottements entre les granulats)



7. BHP/BFUP et BAP

BHR / BFUP



7. BHP/BFUP et BAP

BHR / BFUP

Utilisation et avantages :

Gratte-ciel :

- Colonnes plus mince pour les étages bas – jusqu'à 30% d'espace en plus.
- Construction plus rapide (haute résistance au jeune âge)
- Réduction des coûts → moins d'acier, construction plus rapide.

Mais aussi :

- Résistance (à court et long terme)
- Durabilité
- Étanchéité

7. BHP/BFUP et BAP

BHR / BFUP

Les gratte-ciels

1966-67, Lake Point Tower, Chicago

52 MPa, 70 étages, un tous les 3 jours.

1976, Water Tower, Chicago

62 MPa, 76 étages,
à l'époque le plus haut bâtiment en béton
renforcé

Two Union Square, Seattle

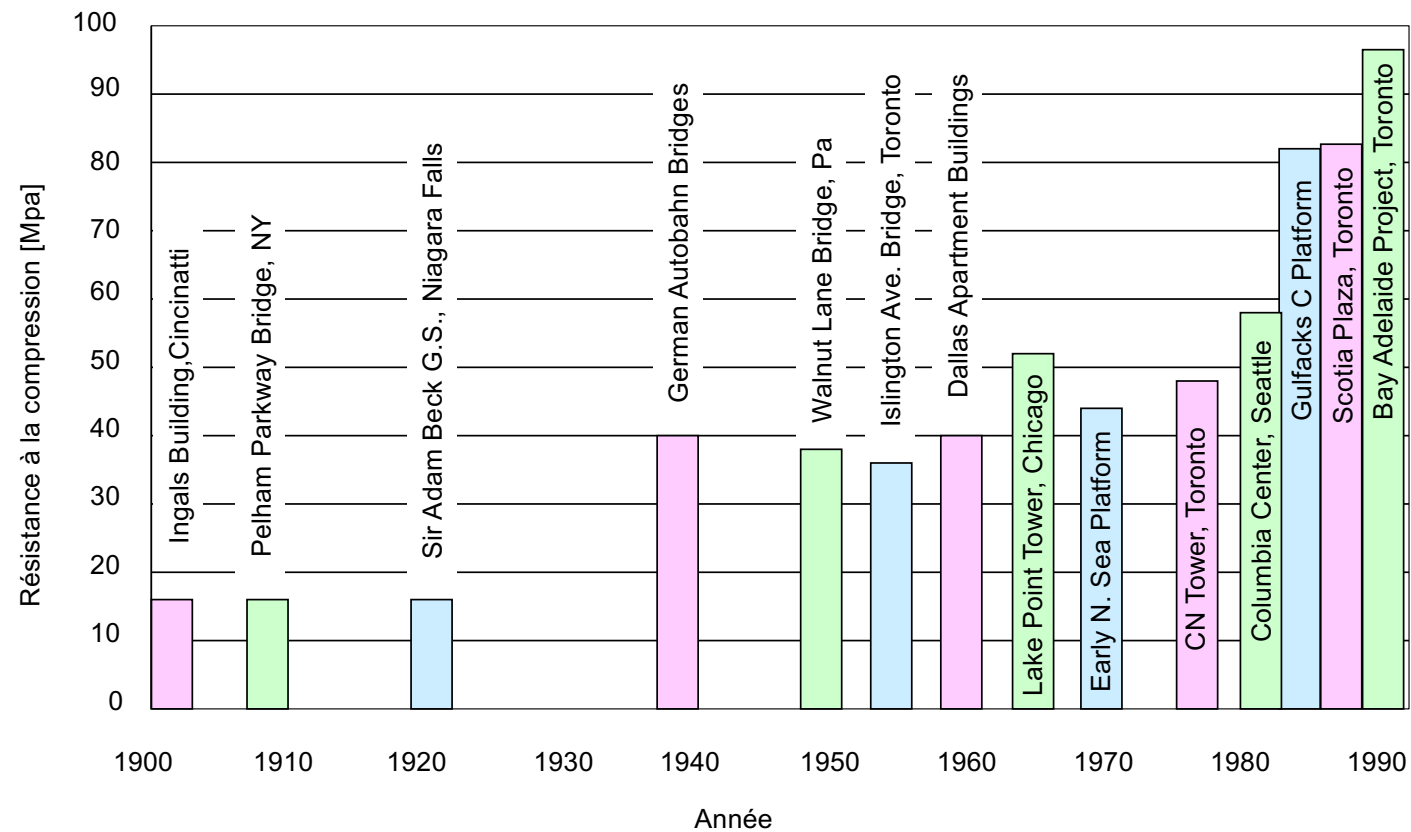
131 MPa la plus haute résistance pour des
applications commerciales



7. BHP/BFUP et BAP

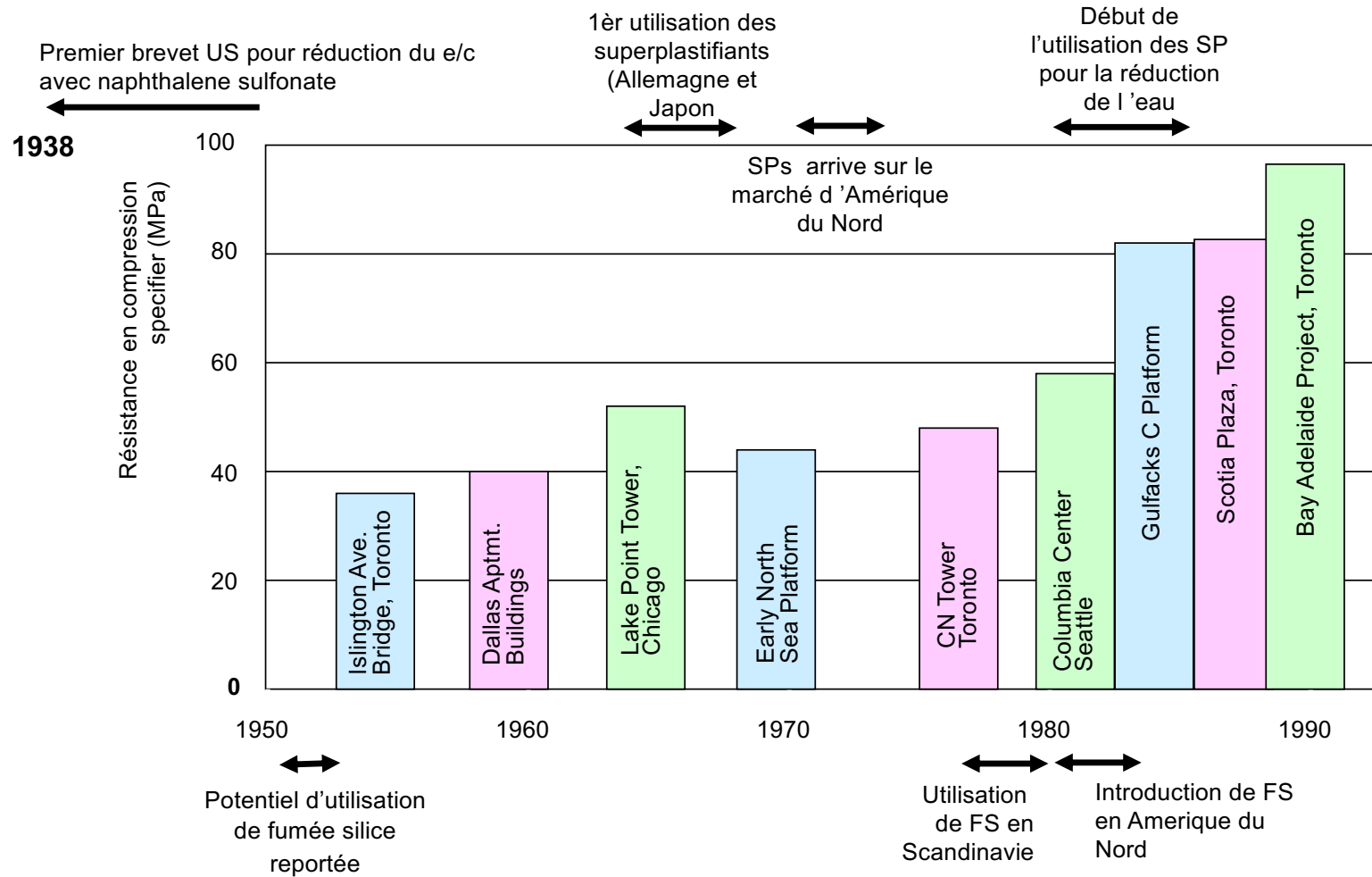
BHR / BFUP

Evolution de BHR



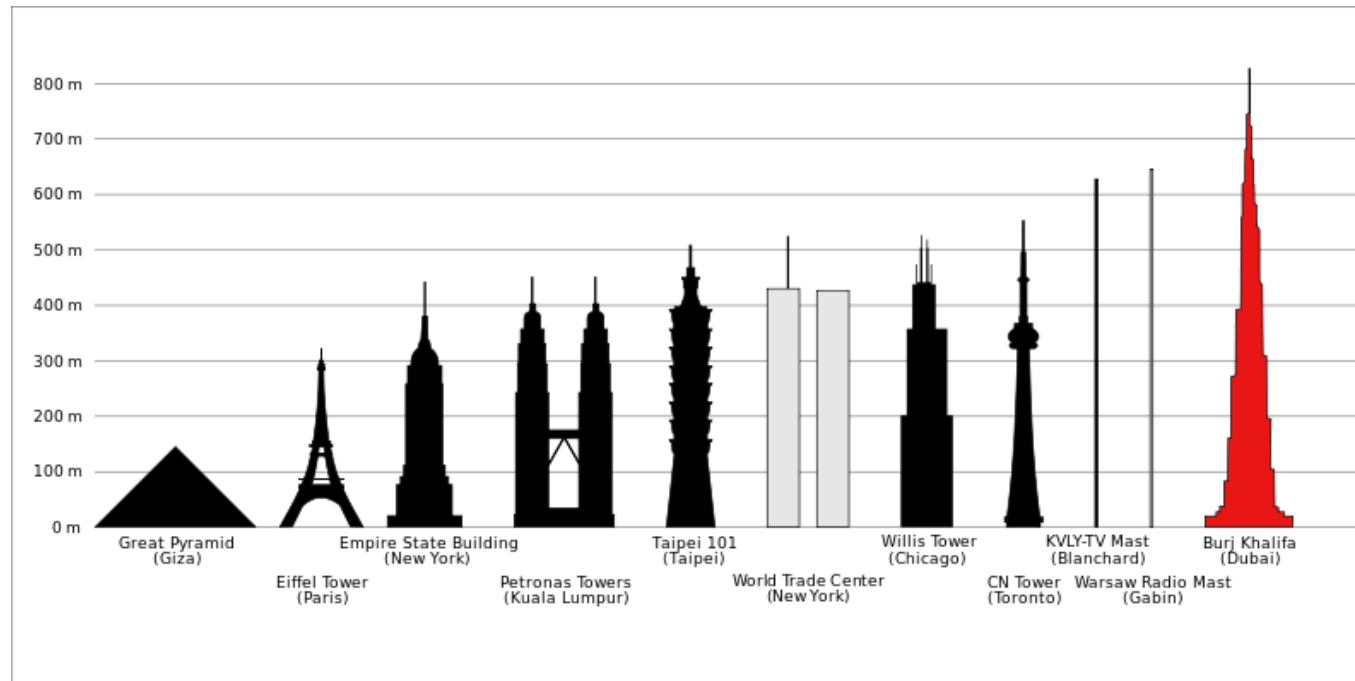
7. BHP/BFUP et BAP

BHR / BFUP



7. BHP/BFUP et BAP

BHR / BFUP



7. BHP/BFUP et BAP

BHR / BFUP

Technologie des matériaux :

- **Augmenter la compacité de la pâte :**
 - Baisse du rapport e/c, augmentation de la teneur en fines
- **Augmenter la compacité du béton :**
 - Optimiser la granularité des granulats
- **Augmenter la résistance mécanique des granulat :**
 - Granulats haute résistance
- **Amélioration de l'ITZ** (zone de transition interfaciale)
 - Choix du granulat (surface rugueuse), utilisation de fumée de silice

7. BHP/BFUP et BAP

BHR / BFUP

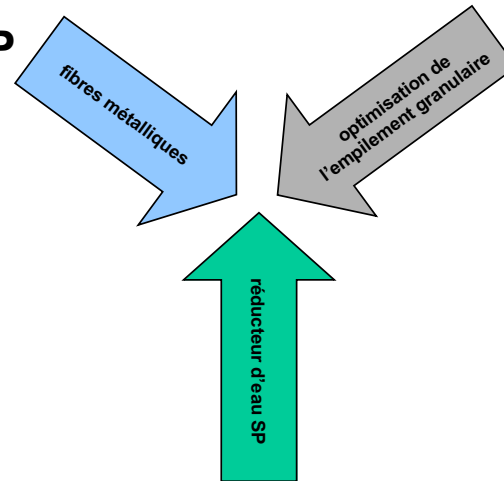
Limitations

- Matériau fragile → rupture catastrophique
- Résistance au feu
- Formulation pointue
 - Qualification nécessaires pour la mise en œuvre et la mise en place
 - Sensibilité aux fluctuations de la température
 - Interactions du ciment avec les adjuvant
- Sensible au retrait et à la fissuration endogène (autodessication)

7. BHP/BFUP et BAP

BHR / BFUP

BFUP :
Béton fibré à ultra
haute performance



Musée des Civilisations de l'Europe et de la Méditerranée à Marseille, façade et passerelle en BFUP. © Rudy Ricciotti

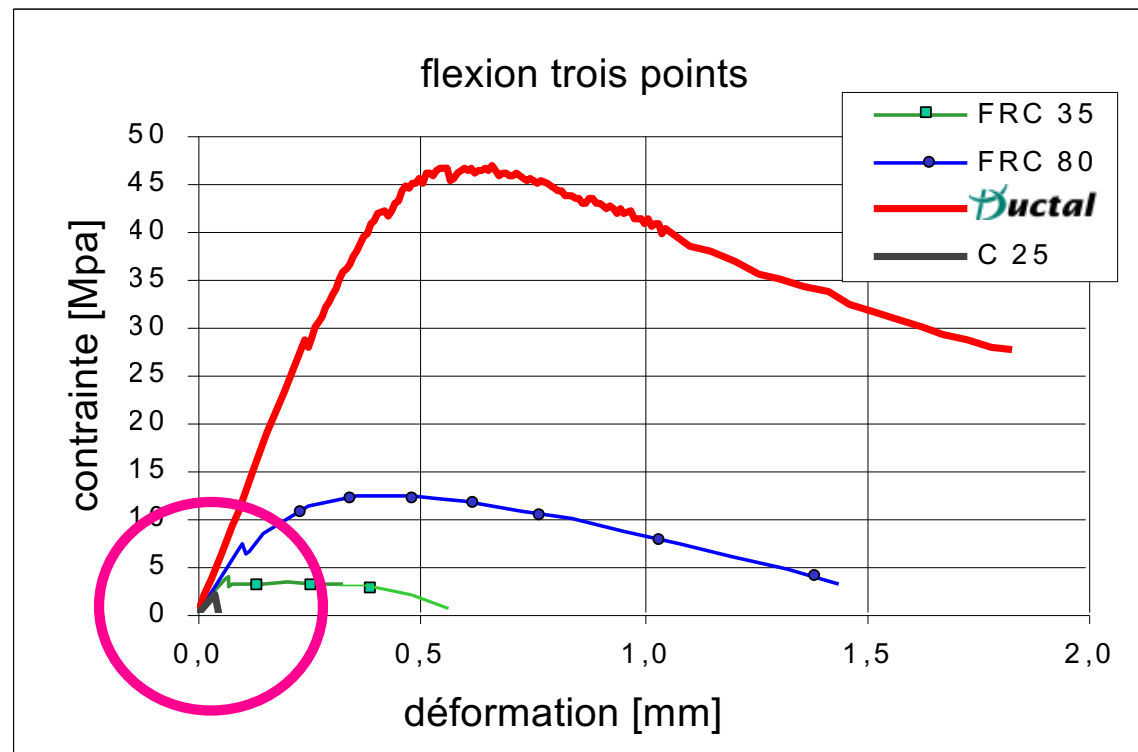


© Alain Herzog /EPFL

7. BHP/BFUP et BAP

BHR / BFUP

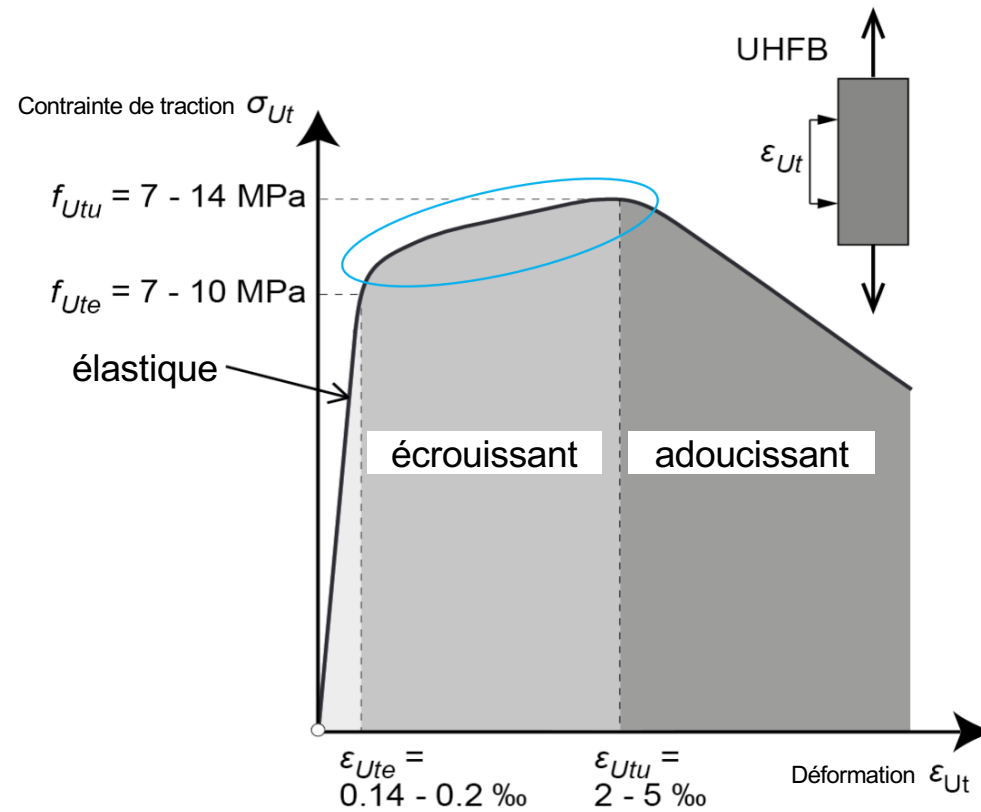
Résistance à la flexion :



7. BHP/BFUP et BAP

BHR / BFUP

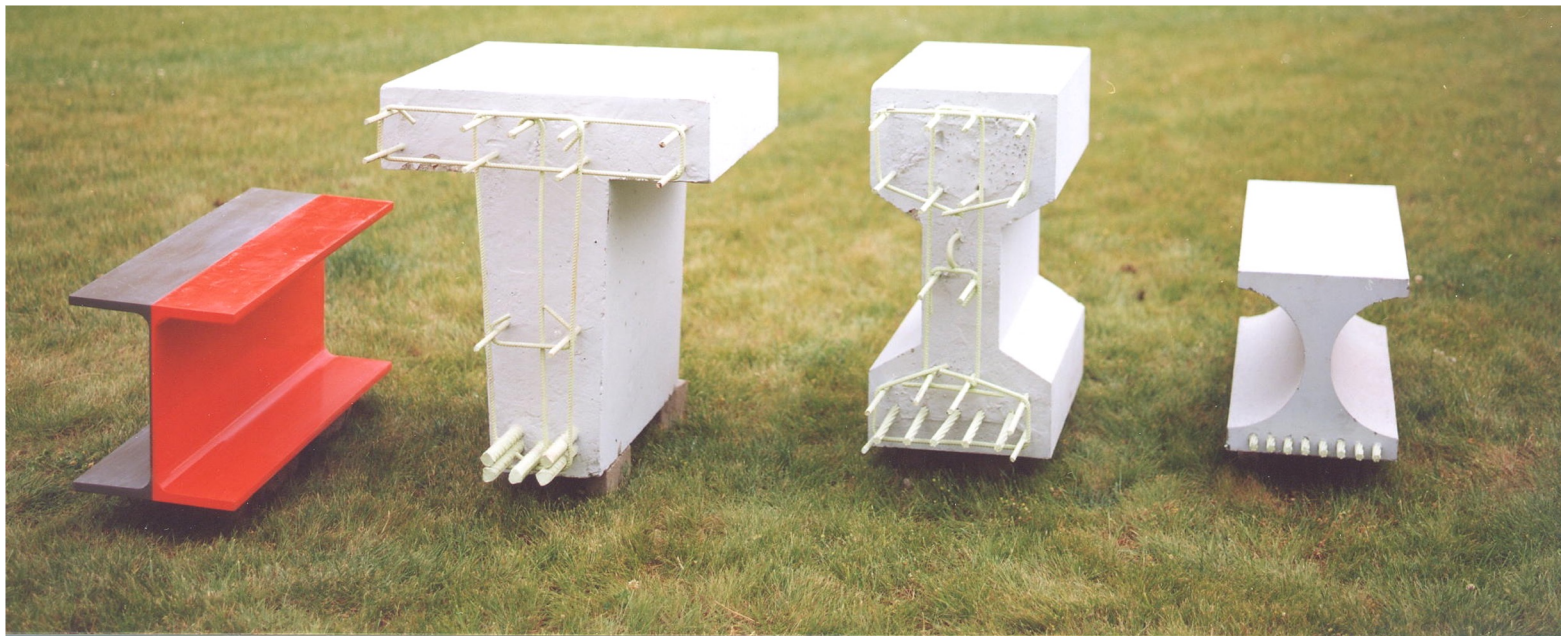
Résistance à la flexion (4 points) :



7. BHP/BFUP et BAP

BHR / BFUP

Poutres avec capacité porteuse équivalente



Poids [kg/ml]

ACIER

117

BÉTON ARMÉ

530

BÉTON
PRÉCONTRAIT

467

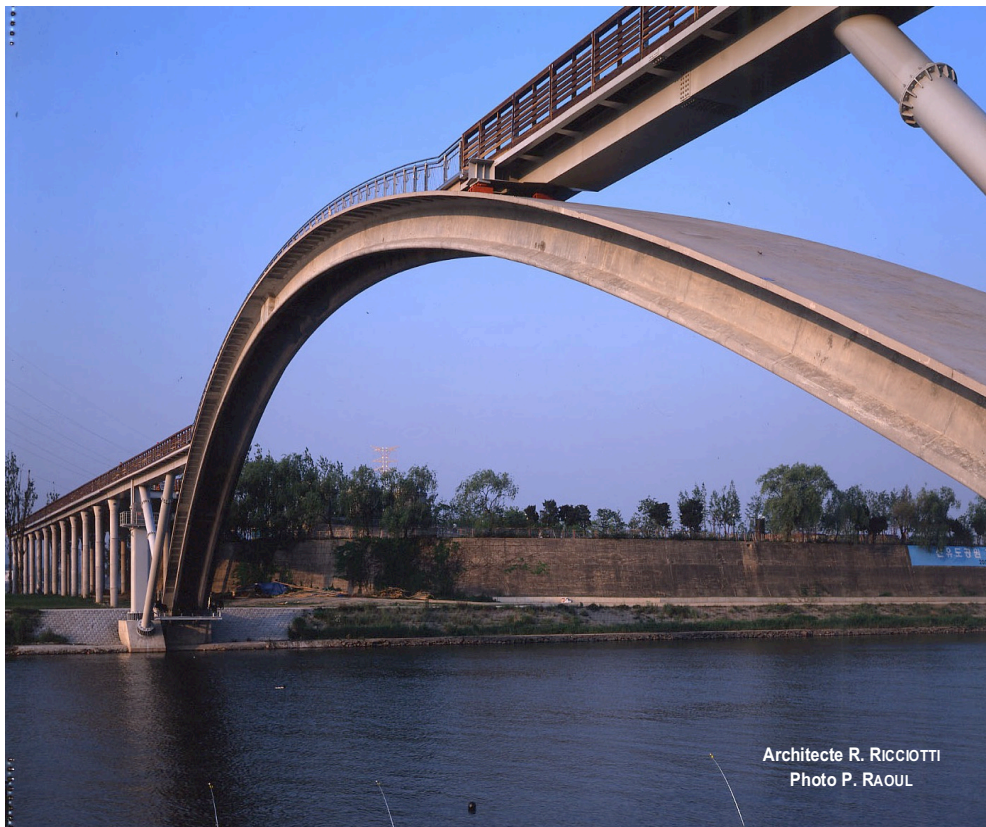
BFUP

140

7. BHP/BFUP et BAP

BHR / BFUP

Passerelle piétonne Seonyu, Séoul, Corée



Portée de l'arche : 120 m
Epaisseur de la dalle : 30 mm

Architecte R. RICCIOTTI
Photo P. RAOUL

7. BHP/BFUP et BAP

BHR / BFUP

Viaduc de Chillon – A9, remise en état du tablier : utilisation de BFUP



7. BHP/BFUP et BAP

BHR / BFUP

Viaduc de Chillon – A9, remise en état du tablier : utilisation de BFUP



7. BHP/BFUP et BAP

BHR / BFUP



Impression 3D du béton

- Possible grâce à une combinaison d'adjuvants
 - Pas de slump
 - Viscosité contrôlée
 - Vitesse de prise
- Produits et applications de niche pour le moment

Avantages	Inconvénients
Main d'oeuvre réduite	Main d'oeuvre très spécialisée
Peu de pertes de matière	Prix élevé (appareils, adjuvants)
Géométries optimisées	Difficulté à intégrer les armatures
	Mortier plutôt que béton

8. L'essentiel

- Quels sont les principaux types d'adjuvants?
- Quels sont leurs fonctions, expliquer les mécanismes
- Comment la technologie des matériaux permet-elle de réaliser des bétons BAP?
- Comment la technologie des matériaux permet-elle de réaliser des bétons BHR et BFUP?
- Quels sont les principaux avantages des BAP?
- Quels sont les principaux avantages des BHR et BFUP?